

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

紊流對長跨徑橋樑顫振及抖振之影響研究

Effects of Turbulence on Flutter and Buffeting of Long-Span Bridges

計畫編號：NSC 90-2211-E-032-009

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：林堉溢 淡江大學土木系

共同主持人：鄭啟明 淡江大學土木系

計畫參與人員：藍朝園 李紹銘 淡江大學土木系

一、中文摘要

本研究藉由斷面模型實驗和數值分析來探討不同紊流對長跨徑橋樑顫振及抖振位移反應的影響。實驗部份是利用符合相似律的流線型斷面與門字型斷面兩模型，分別在紊流強度 5%至 16%進行垂直與扭轉氣動力位移反應的探討；數值分析是利用實驗參數配合數值模型預測橋樑的抖振反應，進而將實驗值利用相似性原理轉換與數值分析比較。由研究結果可知，兩種斷面的垂直向與扭轉向反應均隨著紊流強度的增大而遞增。紊流場的存在會延緩顫振發生，提高顫振臨界風速，並可抑制渦散作用。顫振臨界風速大約隨紊流強度的增大而遞增，然而增加幅度不大。由實驗值配合相似性公式轉換和數值分析的比較，兩者結果大致吻合。

關鍵詞：長跨徑橋樑、斷面模型、顫振、均勻紊流場、抖振

Abstract

The effects of turbulence on buffeting response and flutter wind speed of long-span bridges are investigated through section model tests and a numerical analysis. Two deck sections, a closed box girder and a plate girder, were tested in the smooth and

turbulent flows ranged from 5-16%. The vertical and torsional aerodynamic responses were measured from the test. The interpreted results from the test were then compared to those obtained from a numerical analysis, based on the aerodynamic coefficients. The results indicate that the increase of turbulence intensities will not only increase the buffeting response but also increase the flutter wind speed. Furthermore, the turbulence reduces the vortex-induced response. The discrepancies between the results interpreted from the test and calculated from a numerical analysis are within a reasonable range.

Keyword: long-span bridges, section model, flutter, homogeneous turbulence, buffeting

二、緣由與目的

傳統上橋樑顫振的探討，一般多在平滑流下進行。且從以往的文獻可知，紊流對長跨徑橋樑氣動力穩定性的影響並沒有定論。Scanlan 和 Lin[1] 和 Huston 等人[2] 指出平滑流與紊流所量測的顫振導數並無明顯的差異。Wardlaw 等人[3]發現紊流可抑制渦致振動，在有些情形下可提高顫振臨界風速。Bucher 和 Lin[4]由理論的觀點

指出，紊流對氣動力穩定性的影響，端視能量傳遞而定。Scanlan[5]則指出紊流可提高橋樑的顫振臨界風速。因此本研究藉由斷面模型實驗和數值分析來探討不同紊流對長跨徑橋樑顫振及抖振位移反應的影響。

三、理論背景

一 2-DOF 斷面模型在紊流下所受之擾動風力，可分為自激力與抖振力兩個部分。其運動方程式在垂直與扭轉向可表示為：

$$m_y(\ddot{y} + 2\zeta_y \dot{S}_y \dot{y} + \dot{S}_y^2 y) = L_f + L_b \quad (1)$$

$$I(\ddot{r} + 2\zeta_r \dot{S}_r \dot{r} + \dot{S}_r^2 r) = M_f + M_b \quad (2)$$

其中下標 f, b 分別代表自激力與抖振力。自激力的數學式可表示如下：

$$L_i(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B)(K) \left[H_1^*(K) \frac{\dot{y}(t)}{U} + H_2^*(K) \frac{B\dot{r}(t)}{U} + KH_3^*(K)r(t) \right] \quad (3)$$

$$M_i(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2)(K) \left[A_1^*(K) \frac{y(t)}{U} + A_2^*(K) \frac{Br(t)}{U} + KA_3^*(K)r(t) \right] \quad (4)$$

y, α 為垂直向及扭轉向之位移；H*, A* 是無因次化顫振導數，K=Bω/U 為無因次化頻率，ω 為結構振動的圓周頻率；B 為橋面版寬度；ρ 為空氣密度；U 為平均風速。

而亂流擾動力可表示為：

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left\{ C_L(r_0) \frac{2u(x,t)}{U} + \left[\frac{dC_L}{dr} \right]_{r=r_0} + \frac{A}{B} C_D(r_0) \right\} \frac{w(x,t)}{U} \quad (5)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left\{ \left[C_M(r_0) + C_D(r_0) \frac{Ar}{B^2} \right] \frac{2u(x,t)}{U} + \left[\frac{dC_M}{dr} \right]_{r=r_0} \frac{w(x,t)}{U} \right\} \quad (6)$$

其中 u, w 分別為順風向、垂直向之擾動風速；C_L, C_M 分別為垂直向及扭轉向之風力係數；r₀ 是平均風攻角；A 是單位長度橋面版在垂直向上的投影面積；r 為橋面版質量中心到有效旋轉軸之距離。

斷面模型所量測的位移與全橋反應的相似關係，在垂直向與扭轉向可分別表示為：

$$\frac{(f_y^2)_m}{(f_y^2)_{pr}} = \frac{(w_i^2(x))_m \left[\left(\int_0^L (w_i^2(x))^2 dx \right)^2 \right]_{pr} \left(\int_0^L \int_0^L w_i^2(x_p) w_i^2(x_q) dx_p dx_q \right)_m (B^2)_m}{(w_i^2(x))_{pr}^2 \left[\left(\int_0^L (w_i^2(x))^2 dx \right)^2 \right]_m \left(\int_0^L \int_0^L w_i^2(x_p) w_i^2(x_q) dx_p dx_q \right)_{pr} (B^2)_{pr}} \quad (7)$$

$$\frac{(f_r^2)_m}{(f_r^2)_{pr}} = \frac{(w_i^2(x))_m^2 \left[\left(\int_0^L (w_i^2(x))^2 dx \right)^2 \right]_{pr} \left(\int_0^L \int_0^L w_i^2(x_p) w_i^2(x_q) dx_p dx_q \right)_m}{(w_i^2(x))_{pr}^2 \left[\left(\int_0^L (w_i^2(x))^2 dx \right)^2 \right]_m \left(\int_0^L \int_0^L w_i^2(x_p) w_i^2(x_q) dx_p dx_q \right)_{pr}} \quad (8)$$

其中下標 pr, m 分別代表全橋與斷面模型；φ 為振態形狀函數。

四、實驗配置

1. 風洞：本研究係使用淡江大學大氣邊界層風洞實驗室來進行一系列的風洞模擬實驗。此風洞為一開放吸入式風洞，試驗段長 18.0m，試驗段寬 3.2m，試驗段高 2.0~2.4m。

2. 斷面模型：本研究橋樑斷面，選用兩種典型的幾何形狀。一為流線箱型斷面，以下簡稱 Model 1-3；另一為門字型斷面，以下簡稱為 Model 2-3。符合相似律的模型幾何、質量、頻率縮尺如表 1 所示。其幾何斷面形狀如圖 1 所示。

3. 流場：選用平滑流和五種紊流場，其強度由 5% 至 16%，如表 2 所示。

五、實驗及分析結果

1. 扭轉向實驗結果

圖 2 和圖 4 分別為箱型斷面與門字型斷面扭轉位移和無因次化風速關係圖。從圖中結果可發現，兩種斷面之扭轉位移均隨無因次化風速增加而遞增，同時也隨紊流強度增加而遞增。箱型斷面渦流顫動較門字型斷面明顯，然而渦流顫動隨紊流強度增加而遞減。當風速逼近顫振時，平滑流的反應會急劇增加，而紊流反應增加幅度不若平滑流明顯，但仍可從其反應剛開始急速增加時，來判斷其臨界風速。此兩種斷面之顫振臨界風速如表 3 所示。由表中結果可發現，無論在任何流場箱型斷面都較門字型斷面穩定，表示箱型斷面是較為氣動力穩定的斷面。同時此兩種斷面在紊

流之顫振臨界風速都較平滑流高，此代表紊流會提高氣動力穩定性，而且臨界風速大約隨紊流強度增加而遞增，此種趨勢在箱型斷面較明顯。

2. 垂直向實驗結果

圖 3 和圖 5 分別為箱型斷面與門字型斷面垂直位移和無因次化風速關係圖。從圖中結果可發現，兩種斷面之垂直位移均隨無因次化風速增加而遞增，同時也隨紊流強度增加而遞增。與扭轉向驅趨勢不同的是，門字型斷面渦流顫動較箱型斷面明顯。不過渦流顫動隨紊流強度增加而遞減。

3. 實驗結果與數值分析比較

本研究使用的原型橋樑是一主跨 720m、兩個邊跨都為 220m 的斜張橋，斷面採用 model 1-3 的箱型斷面，其幾何形狀如圖 6 所示，此橋的第一垂直向與扭轉向振態頻率如表 1 所示。在紊流強度 10% 下，實驗量測的結果經相似律轉換後，其扭轉向與垂直向反隨實場風速的結果如圖 7-8 所示。依據同一模型風力係數及顫振導數所計算的結果也示於圖 7-8，從比較發現兩者結果大約吻合。兩者顫振臨界風速的結果也示於表 4，其差距也大約吻合。

六. 結論

由本文所提及之實驗與數值分析結果，可得下列結論：(1)兩種斷面的垂直向與扭轉向反應均隨著紊流強度的增大而遞增；(2)紊流場的存在會延緩顫振發生，提高顫振臨界風速，並可抑制渦散作用；(3)顫振臨界風速大約隨紊流強度的增大而遞增，然而增加幅度不大；(4)由實驗值配合相似性公式轉換和數值分析的比較，兩者結果大致吻合。

七. 參考文獻

1. Scanlan, R.H. and Lin, W.H., (1978),

“Effects of turbulence on bridge flutter derivatives”, *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, **104**, 719-733.

2. Huston D.R., Bosch, H.R. and Scanlan, R.H., (1988), “The effect of fairing and of turbulence on the flutter derivatives of a notably unstable bridge deck”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **29**, 339-349.
3. Wardlaw, R.L., Tanaka, H. and Utsunomiya, H., (1983), “Wind tunnel experiments on the effects of turbulence on the aerodynamic behavior of bridge road decks”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **14**, 247-257.
4. Bucher, C. G. and Lin, Y. K., (1990), “Effects of wind turbulence on motion stability of long-span bridges”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **36**, 1355-1364.
5. Scanlan, R. H., (1997), “Amplitude and turbulence effects on bridge flutter derivatives”, *J. Struct. Eng., ASCE*, **123**, 232-236.

Table 1 Sectional properties of the prototype and sectional models

	prototype	model 1	model 2
width (m)	34.5 (20 for model 2-3)	0.35	0.2
mass (kg/m)	25400	2.54	2.54
polar mass (kg-m ² /m)	3,600,000	0.036	0.036
Ver. Freq. (Hz)	0.167	5.13	5.14
Tor. Freq. (Hz)	0.368	12.15	12.21

Table 2 Properties of turbulent flows

flow field	s	a	b	c	d	e
------------	---	---	---	---	---	---

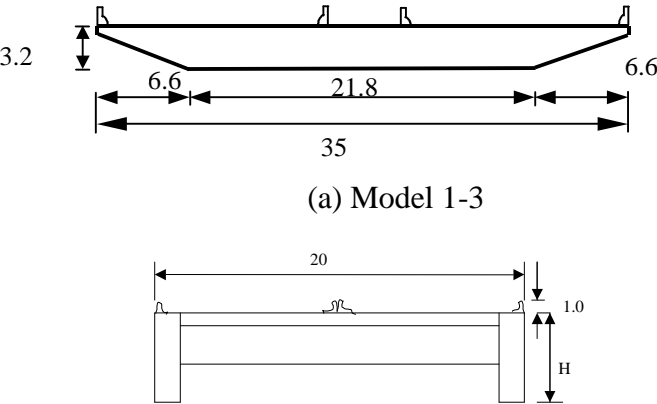
turbulence intensity (%)	1	5	8	10	12	16
--------------------------	---	---	---	----	----	----

Table 3 Flutter wind speeds under turbulent flows (m/s)

Flow	s	a	b	c	d	e
Model 1	19.7	20.2	20.5	20.9	21.0	21.2
Model 2	13.1	14.1	14.5	14.4	14.4	15.4

Table 4 Flutter wind speeds of the prototype bridge under turbulent flows (m/s)

Flow field	s	a	b	c	d	e
Test	59.2	60.7	61.4	62.7	63.0	63.7
Num.	59.8	61.5	62.7	-	65.4	71.3



(b) Model 2-3

圖 1 橋樑斷面

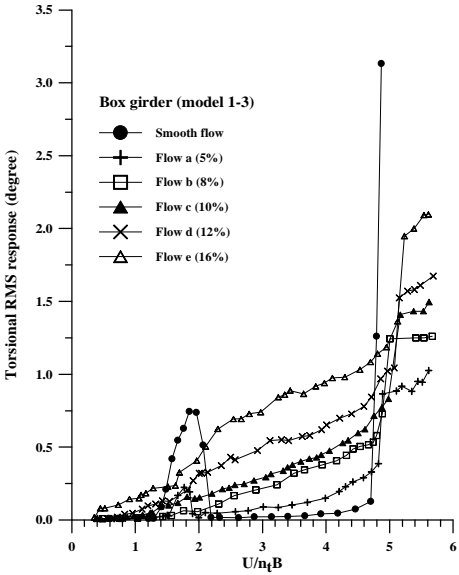


圖 2 箱型斷面扭轉向位移反應圖

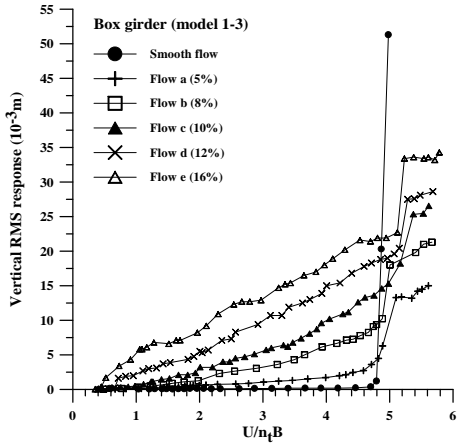


圖 3 箱型斷面垂直向位移反應圖

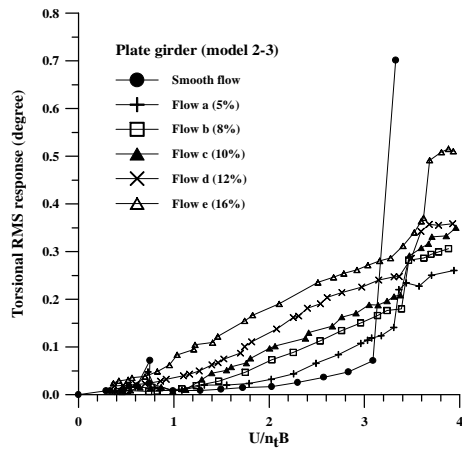


圖 4 門字型斷面扭轉向位移反應圖

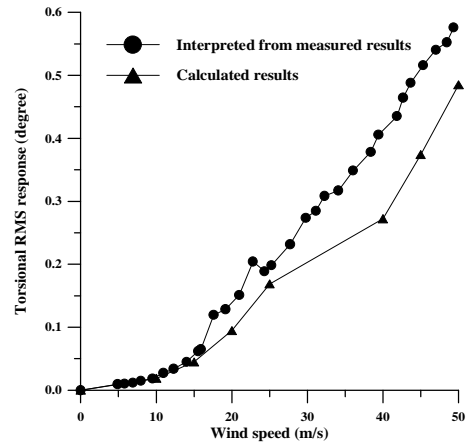


圖 7 實驗與數值計算扭轉向位移反應

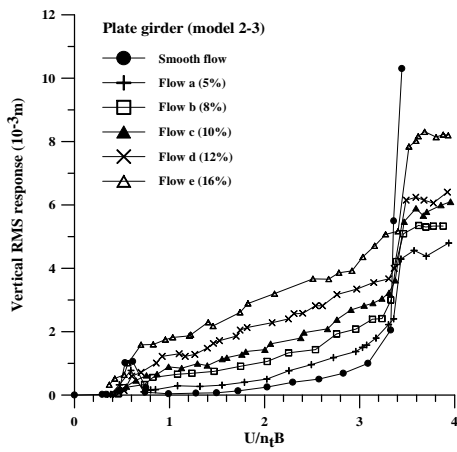


圖 5 門字型垂直斷面向位移反應圖

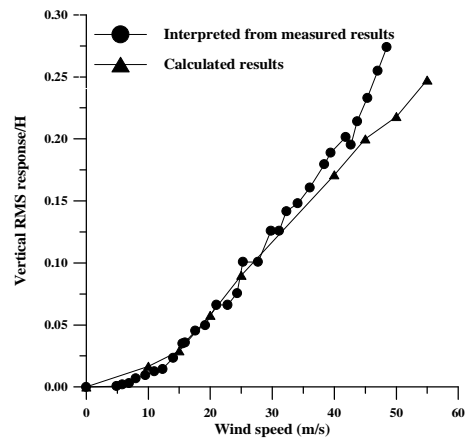


圖 8 實驗與數值計算垂直向位移反應

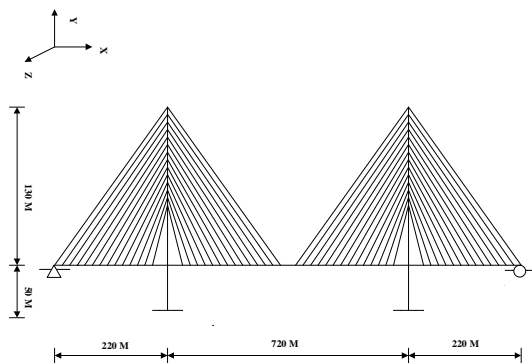


圖 6 斜張橋幾何形狀圖